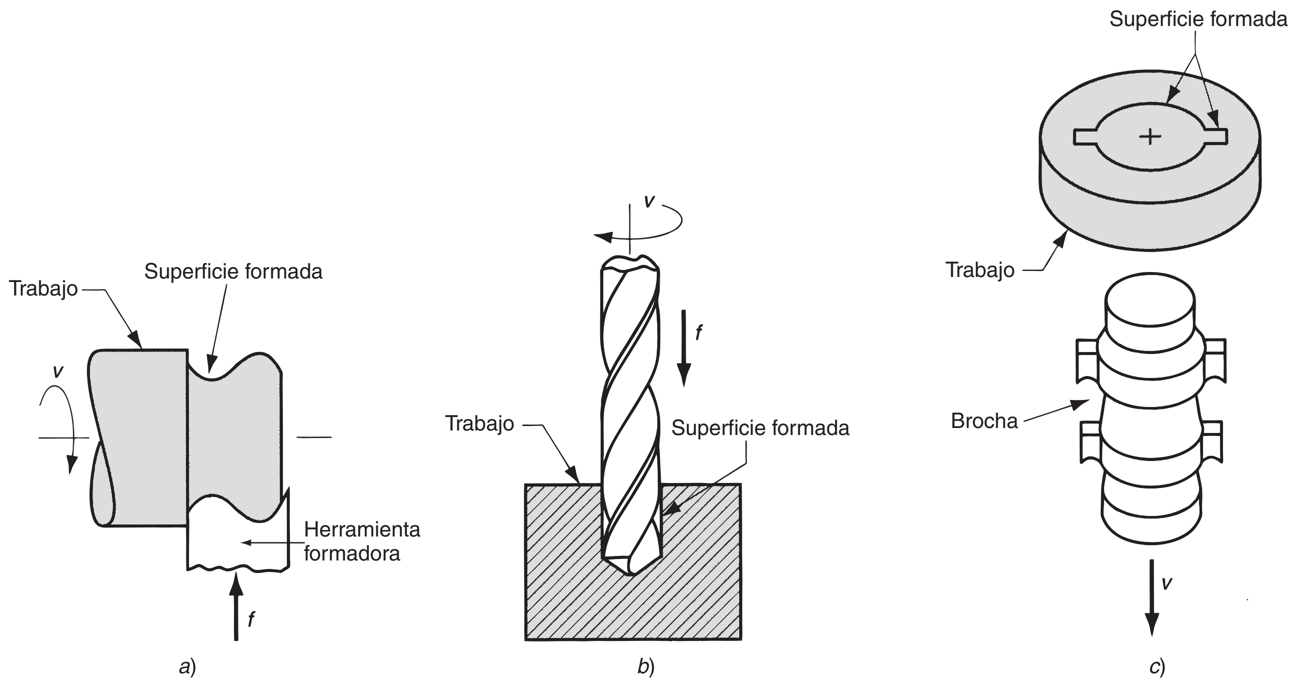


FIGURA 22.3 Creación de formas en maquinado: *a*) torneado de formas, *b*) taladrado y *c*) brochado.

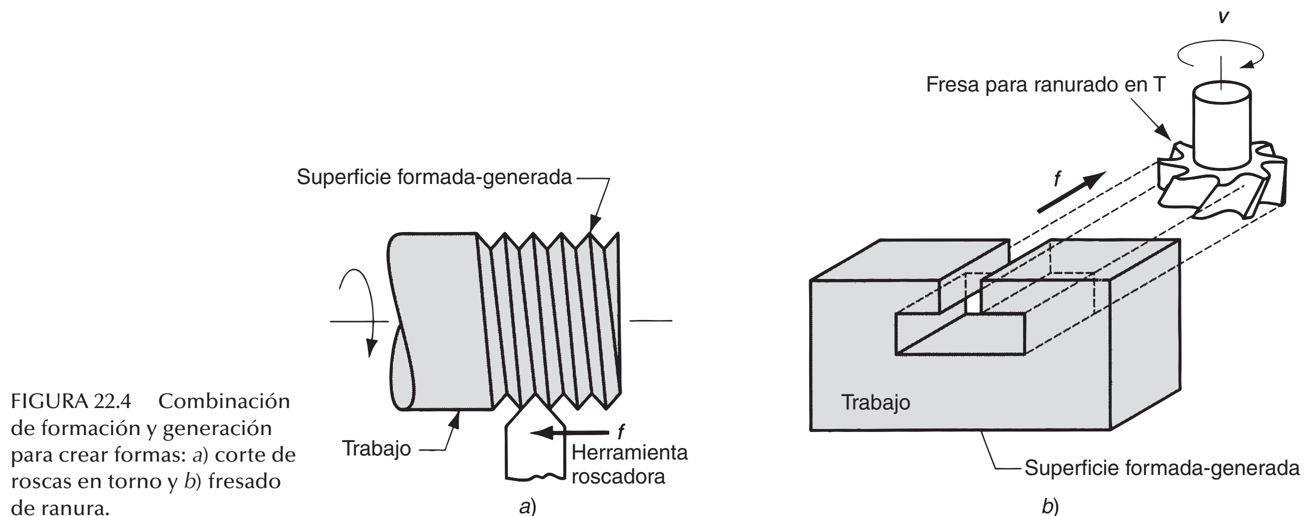


FIGURA 22.4 Combinación de formación y generación para crear formas: *a*) corte de roscas en torno y *b*) fresado de ranura.

22.1 TORNEADO Y OPERACIONES AFINES

El ***torneado*** es un proceso de maquinado en el cual una herramienta de una sola punta remueve material de la superficie de una pieza de trabajo cilíndrica en rotación; la herramienta avanza linealmente y en una dirección paralela al eje de rotación, como se ilustra en las figuras 21.3*a*), 21.5 y 22.5. El torneado se lleva a cabo tradicionalmente en una

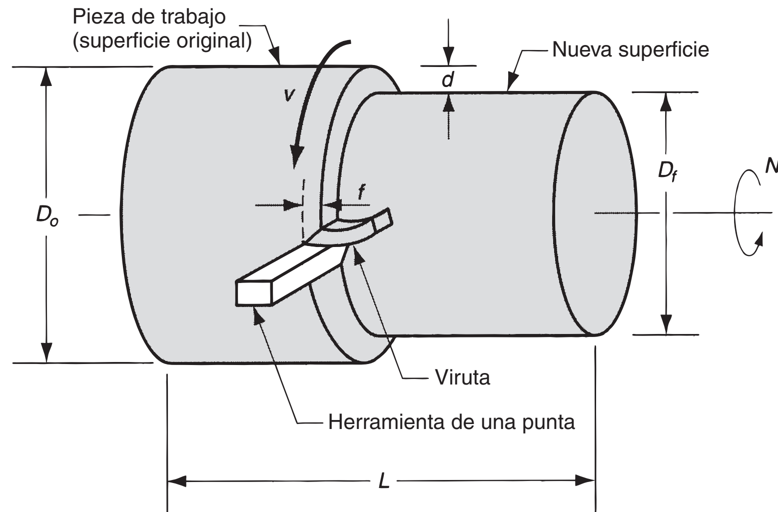


FIGURA 22.5 Operación de torneado.

máquina herramienta llamada ***torno***, la cual suministra la potencia para tornear la pieza a una velocidad de rotación determinada con avance de la herramienta y profundidad de corte especificados.

22.1.1 Condiciones de corte en el torneado

La velocidad de rotación en el torneado se relaciona con la velocidad de corte requerida en la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo por la ecuación

$$N = \frac{v}{\pi D_o} \tag{22.1}$$

donde N = velocidad de rotación, rev/min; v = velocidad de corte, m/min (ft/min); y D_o = diámetro original de la pieza, m (ft).

La operación de torneado reduce el diámetro del trabajo D_o al diámetro final D_f. El cambio de diámetro se determina por la profundidad de corte d:

$$D_f = D_o - 2d \tag{22.2}$$

El avance en el torneado se expresa generalmente en mm/rev (in/rev). Este avance se puede convertir a velocidad de avance lineal en mm/min (in/min) mediante la fórmula:

$$f_r = Nf \tag{22.3}$$

donde f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min); y f = avance, mm/rev (in/rev).

El tiempo para maquinar una pieza de trabajo cilíndrica de un extremo a otro está dado por

$$T_m = \frac{L}{f_r} \tag{22.4}$$

donde T_m = tiempo de maquinado en min; y L = longitud de la pieza cilíndrica en mm (in). Un cálculo más directo del tiempo de maquinado lo proporciona la ecuación siguiente:

$$T_m = \frac{\pi D_o L}{f v} \tag{22.5}$$

donde D_o = diámetro del trabajo, mm (in); L =longitud de la pieza de trabajo, mm (in); f = avance, mm/rev (in/rev); y v = velocidad de corte, mm/min (in/min). Como práctica general, se añade una pequeña distancia a la longitud al principio y al final de la pieza de trabajo para dar margen a la aproximación y al sobrerrecorrido de la herramienta.

La velocidad volumétrica de remoción del material se puede determinar más convenientemente por la ecuación siguiente:

$$R_{MR} = vfd \tag{22.6}$$

donde R_{MR} = velocidad de remoción de material, mm^3/min (in^3/min). En esta ecuación las unidades de f se expresan simplemente como mm (in), ignorando el efecto de la rotación del torneado. Asimismo, se debe tomar las medidas necesarias para asegurarse de que las unidades de la velocidad sean consistentes con las de f y d.

22.1.2 Operaciones relacionadas con el torneado

Además del torneado, se puede realizar una gran variedad de operaciones de maquinado en un torno. En la figura 22.6 se ilustran las siguientes:

a) ***Careado.*** La herramienta se alimenta radialmente sobre el extremo del trabajo rotatorio para crear una superficie plana.

b) ***Torneado ahusado o cónico.*** En lugar de que la herramienta avance paralelamente al eje de rotación del trabajo, lo hace en cierto ángulo creando una forma cónica.

c) ***Torneado de contornos.*** En lugar de que la herramienta avance a lo largo de una línea recta paralela al eje de rotación como en torneado, sigue un contorno diferente a la línea recta, creando así una forma contorneada en la pieza torneada.

d) ***Torneado de formas.*** En esta operación llamada algunas veces ***formado***, la herramienta tiene una forma que se imparte al trabajo y se hunde radialmente dentro del trabajo.

e) ***Achaflanado.*** El borde cortante de la herramienta se usa para cortar un ángulo en la esquina del cilindro y forma lo que se llama un “chaflan”.

f) ***Tronzado.*** La herramienta avanza radialmente dentro del trabajo en rotación, en algún punto a lo largo de su longitud, para trozar el extremo de la pieza. A esta operación se le llama algunas veces ***partición***.

g) ***Roscado.*** Una herramienta puntiaguda avanza linealmente a través de la superficie externa de la pieza de trabajo en rotación y en dirección paralela al eje de rotación, a una velocidad de avance suficiente para crear cuerdas roscadas en el cilindro.

h) ***Perforado.*** Una herramienta de punta sencilla avanza en línea paralela al eje de rotación, sobre el diámetro interno de un agujero existente en la pieza.

i) ***Taladrado.*** El taladrado se puede ejecutar en un torno, haciendo avanzar la broca dentro del trabajo rotatorio a lo largo de su eje. El ***escariado*** se puede realizar en forma similar.

j) ***Moleteado.*** Ésta es una operación de maquinado porque no involucra corte de material. Es una operación de formado de metal que se usa para producir un rayado regular o un patrón en la superficie de trabajo.

Las herramientas de una sola punta (sección 23.3.1) se usan en la mayoría de las operaciones ejecutadas en tornos. Las herramientas de corte para el torneado, careado, ahusado, contorneado, chaflanado y perforado son herramientas de una sola punta. Una operación de roscado se ejecuta usando una herramienta plana sencilla, diseñada con la

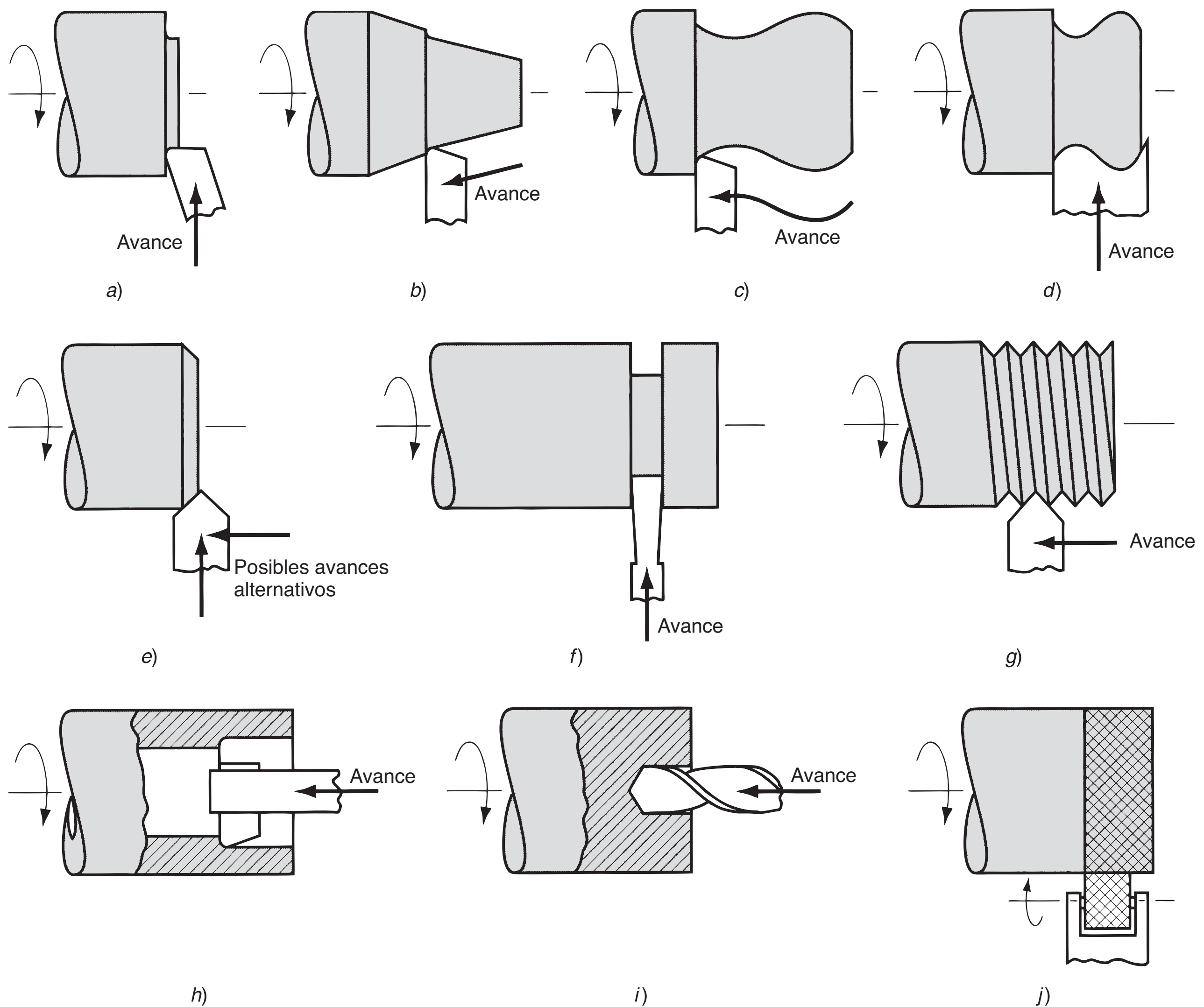


FIGURA 22.6 Otras operaciones diferentes al torneado que se realizan en un torno: *a*) careado, *b*) torneado ahusado, *c*) torneado de contornos, *d*) torneado de formas, *e*) achaflanado, *f*) tronzado, *g*) roscado, *h*) perforado, *i*) taladrado y *j*) moleteado.

forma de la cuerda a producir. Ciertas operaciones requieren herramientas diferentes a las de una sola punta. El torneado de formas se ejecuta con una de diseño especial llamada herramienta de forma. El perfil de la forma tallada en la herramienta establece la forma de la pieza de trabajo. Una herramienta de tronzado es básicamente una herramienta de forma. El taladrado se realiza mediante una broca (sección 23.3.2). El moleteado se ejecuta con una herramienta de moleteado que consiste en dos rodillos formadores endurecidos y montados sobre sus centros. Los rodillos formadores tienen el patrón de moleteado deseado en sus superficies. Para ejecutar el moleteado, se presiona la herramienta contra la superficie de la pieza rotatoria con la presión suficiente para imprimir el patrón sobre la superficie de trabajo.

22.1.3 El torno mecánico

El torno básico usado para torneado y operaciones afines es un ***torno mecánico***. Es una máquina herramienta muy versátil que se opera en forma manual y se utiliza ampliamente en producción baja y media. El término ***máquina*** (engine en inglés) se originó en el tiempo en que estos mecanismos eran movidos por máquinas de vapor.

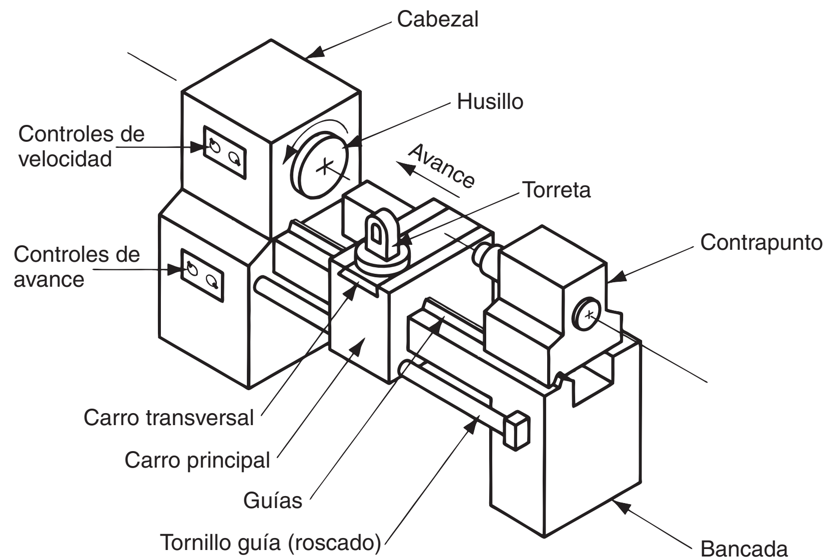


FIGURA 22.7 Diagrama de un torno mecánico, en que se indican sus componentes principales.

Tecnología del torno mecánico. La figura 22.7 es un diagrama de un torno mecánico en el que se muestran sus componentes principales. El ***cabezal*** contiene la unidad de transmisión que mueve el husillo que hace girar al trabajo. Opuesta al cabezal está el ***contrapunto***, en el cual se monta un centro para sostener el otro extremo de la pieza de trabajo.

La herramienta de corte es sostenida por una ***torreta*** que se encuentra fija al ***carro transversal***, que se ensambla al ***carro principal***. El carro principal se diseña para deslizarse sobre las ***guías*** del torno a fin de hacer avanzar la herramienta paralelamente al eje de rotación. Las guías son una especie de rieles a lo largo de los cuales se mueve el carro y están hechas con gran precisión para lograr un alto grado de paralelismo respecto al eje del husillo. Las guías se construyen sobre la ***bancada*** del torno que provee un armazón rígido para la máquina herramienta.

El carro se mueve por medio de un tornillo guía que gira a la velocidad propia para obtener la velocidad de avance deseada. El carro transversal está diseñado para avanzar en una dirección perpendicular al movimiento del carro. Por tanto, al mover el carro, la herramienta puede avanzar paralela al eje del trabajo para ejecutar el torneado recto. Y al mover el carro transversal, la herramienta puede avanzar radialmente dentro del trabajo para ejecutar el careado, el torneado de forma o la operación de tronzado.

El torno mecánico convencional y la mayoría de otras máquinas descritas en esta sección son ***máquinas de torneado horizontal***, es decir, el eje del husillo es horizontal. Esto es adecuado para la mayoría de los trabajos de torno donde la longitud es mayor que el diámetro. Para trabajos donde el diámetro es mayor que la longitud y el trabajo es pesado, es más conveniente orientar el trabajo de manera que gire alrededor de un eje vertical; éstas son las ***máquinas de torneado vertical***.

El tamaño del torno se designa por el volteo y la máxima distancia admisible entre centros. El ***volteo*** es el diámetro máximo de la pieza de trabajo que puede girar el husillo; se determina como el doble de la distancia que existe entre el eje central del husillo y las guías de la máquina. El máximo tamaño real de la pieza de trabajo cilíndrica que puede acomodarse en el torno es algo más pequeña, debido a que el carro y la corredera lateral están sobre las guías. ***La máxima distancia entre los centros*** indica la longitud máxima de la pieza de trabajo que puede ser montada entre el cabezal y el contrapunto. Por ejemplo, un torno de 350 mm × 1.2 m (14 in × 48 in) indica que el volteo es de 350 mm (14 in) y la máxima distancia entre centros es de 1.2 m (48 in).

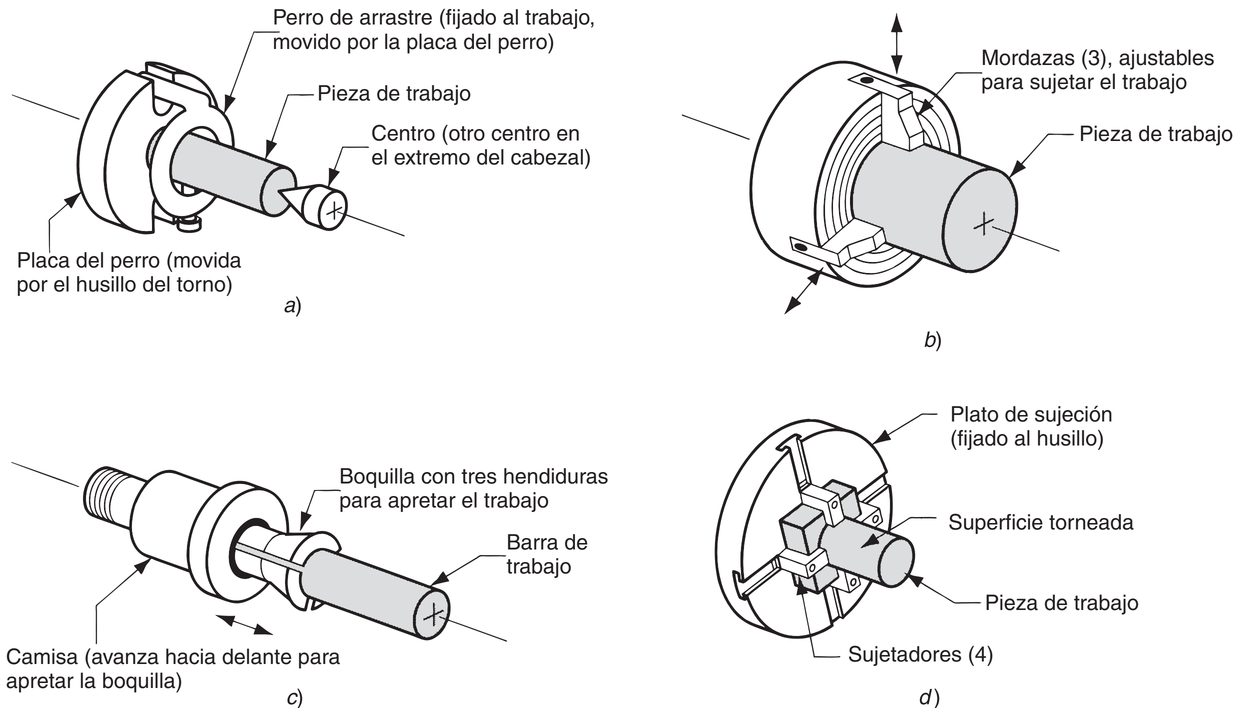


FIGURA 22.8 Cuatro métodos para sujetar el trabajo en un torno: *a*) montado del trabajo entre centros usando un perro de arrastre, *b*) mandril de tres mordazas, *c*) boquilla y *d*) plato de sujeción para piezas de trabajo no cilíndricas.

Métodos de sujeción del trabajo al torno Se usan cuatro métodos comunes para sujetar las piezas de trabajo en el torneado, que a su vez consisten en varios mecanismos para sujetar el trabajo, centrarlo y mantenerlo en posición sobre el eje del husillo y hacerlo girar. Los métodos se ilustran en la figura 22.8 y son: *a*) montura de trabajo entre centros, *b*) mandril, *c*) boquilla y *d*) plato de sujeción.

La sujeción de trabajo ***entre centros*** se refiere al uso de dos centros, uno en el cabezal y el otro en el contrapunto, como se muestra en la figura 22.8*a*). Este método es apropiado para piezas que tienen una alta relación entre la longitud y el diámetro. En el centro del cabezal se fija una brida llamada ***perro*** o plato de arrastre, en la parte exterior del trabajo que se usa para transmitir la rotación del husillo. El centro del contrapunto tiene una punta en forma de cono que se inserta en un agujero practicado en el extremo del trabajo. El centro del contrapunto puede ser un centro "vivo" o un centro "muerto". ***Un centro vivo*** gira en un cojinete del contrapunto, de manera que no hay rotación relativa entre el trabajo y el centro vivo y por tanto no hay fricción. En contraste, un ***centro muerto*** está fijo en el contrapunto y no gira; la pieza de trabajo gira alrededor de la punta. Debido a la fricción y a la acumulación del calor que resulta, esta disposición se usa normalmente a menores velocidades de rotación. El centro vivo se puede usar a altas velocidades.

El ***mandril***, figura 22.8*b*), tiene varios diseños, con tres o cuatro mordazas para sostener la pieza cilíndrica sobre su diámetro exterior. Las mordazas se diseñan frecuentemente para sostener también el diámetro interior de una pieza tubular. Un mandril ***autocentrante*** tiene un mecanismo que mueve simultáneamente las mordazas hacia dentro o hacia fuera, y de esta forma centra el trabajo en el eje del husillo. Otros mandriles permiten la operación independiente de cada mordaza. Los mandriles se pueden usar con o sin el centro del contrapunto. Para piezas con baja relación entre la longitud y el diámetro, la sujeción

de la pieza al mandril en forma empotrada (en voladizo) es por lo general suficiente para soportar las fuerzas de corte. Para barras largas de trabajo se necesita el soporte del contrapunto.

Una ***boquilla*** consiste en un buje tubular con hendiduras longitudinales que corren sobre la mitad de su longitud e igualmente espaciadas alrededor de su circunferencia, como se muestra en la figura 22.8*c*). El diámetro interior de la boquilla se usa para sostener trabajos de forma cilíndrica como barras. Debido a las hendiduras, un extremo de la boquilla puede apretarse para reducir su diámetro y suministrar una presión de agarre segura sobre el trabajo. Como hay un límite en la reducción que se puede obtener en una boquilla de cualquier diámetro, estos dispositivos de sujeción del trabajo se deben hacer en varias medidas para igualar el tamaño particular de la pieza de trabajo.

Un ***plato de sujeción***, figura 22.8*d*), es un dispositivo para sujetar el trabajo que se fija al husillo del torno y se usa para sostener piezas con formas irregulares. Debido a su forma irregular, estas piezas no se pueden sostener por otros métodos de sujeción. Por tanto, el plato está equipado con mordazas diseñadas a la medida de la forma particular de la pieza.

22.1.4 Otros tornos y máquinas de torneado

Además de los tornos mecánicos, se han inventado otras máquinas de tornear para satisfacer funciones particulares o para automatizar el proceso de torneado. Entre estas máquinas están: 1) el torno para herramientas, 2) el torno de velocidad, 3) el torno revólver, 4) el torno de mandril, 5) la máquina automática de tornillos y 6) el torno controlado numéricamente.

El torno para herramientas y el torno de velocidad están íntimamente relacionados con el torno mecánico. ***El torno para herramientas*** es más pequeño y tiene más velocidades y avances disponibles. Se construye también para precisiones más altas en concordancia con su propósito de fabricar componentes para herramientas, accesorios y otros dispositivos de alta precisión.

El torno de velocidad es más simple en su construcción que el torno mecánico. No tiene carro principal ni carro transversal ni tampoco tornillo guía para manejar el carro. El operador sostiene la herramienta de corte usando un sostén fijo en la bancada del torno. Las velocidades son más altas en el torno de velocidad, pero el número de velocidades es limitado. Las aplicaciones de este tipo de máquina incluyen el torneado de madera, el rechazado de metal y operaciones de pulido.

Un torno revólver es un torno operado manualmente en el cual el contrapunto se ha reemplazado por una torreta que sostiene hasta seis herramientas de corte. Estas herramientas se pueden poner rápidamente en acción frente al trabajo, una por una, girando la torreta. Además, el poste convencional de herramientas que se usa en el torno mecánico está remplazado por una torreta de cuatro lados, que es capaz de poner cuatro herramientas en posición. Dada la capacidad de cambios rápidos de herramientas, el torno revólver se usa para trabajos de alta producción que requieren una secuencia de cortes sobre la pieza.

El torno de mandril, como su nombre lo indica, usa un mandril en el husillo para sostener la pieza de trabajo. El contrapunto está ausente en esta máquina, de manera que las piezas no se pueden montar entre los centros. Esto restringe el uso de un torno de mandril a piezas cortas y ligeras. La disposición de la operación es similar al torno revólver, excepto porque las acciones de avance de las herramientas de corte se controlan más en forma automática que mediante un operador. La función del operador es cargar y descargar las piezas.

Una máquina de barra es similar al torno de mandril, excepto porque se usa una boquilla en lugar de un mandril, la cual permite alimentar barras largas a través del cabezal en posición de trabajo. Al final de cada ciclo de maquinado, una operación de corte retira la

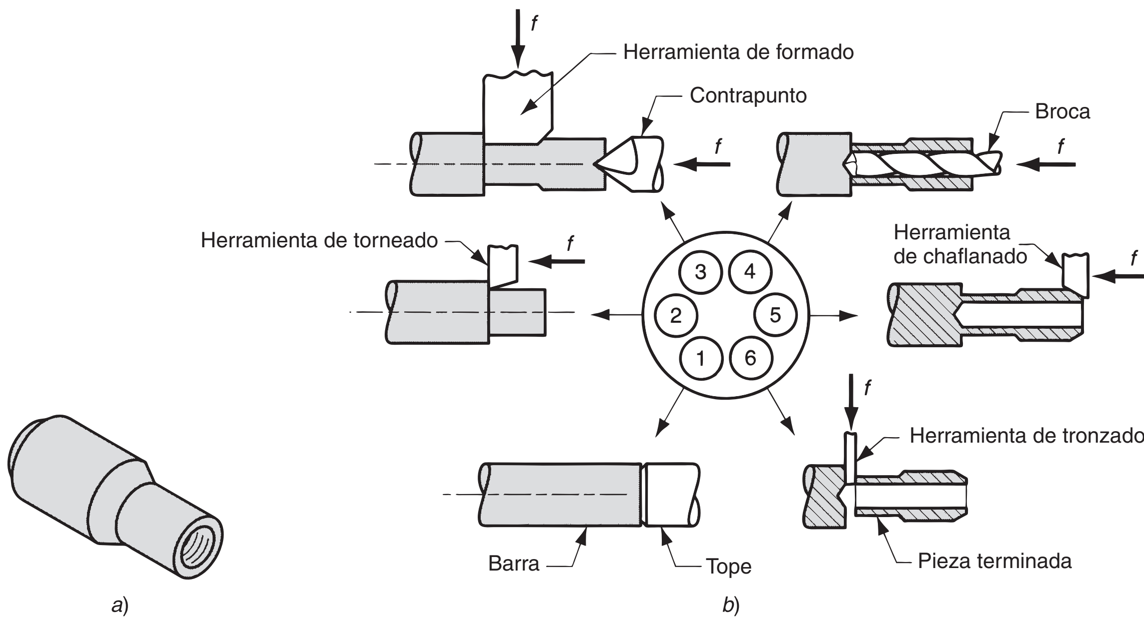


FIGURA 22.9 *a*) Tipo de pieza producida en una máquina de barras automática de seis husillos y *b*) secuencia de operaciones para producir la pieza: 1) avance del material hasta el tope, 2) torneado del diámetro principal, 3) formado del segundo diámetro y centrado, 4) taladrado, 5) achaflanado y 6) tronzado.

pieza torneada. La barra se corre entonces hacia delante para presentar nuevo material para la próxima pieza. El avance del material, así como los corrimientos y los avances de las herramientas de corte, se realizan automáticamente. Debido al alto nivel de operación automática, frecuentemente se le da a esta máquina el nombre de ***máquina de barras automática***. Una aplicación importante de este tipo de máquinas es la producción de tornillos y piezas similares de artículos de ferretería. A menudo se usa el término ***máquina automática de tornillos*** para las máquinas que se usan en estas aplicaciones.

Las máquinas de barras pueden clasificarse como de husillo simple y de husillo múltiple. ***Una máquina de barras de husillo*** simple tiene un husillo que permite usar solamente una herramienta de corte a la vez por cada pieza que se maquina. Por tanto, mientras cada herramienta corta el trabajo las otras herramientas están ociosas (los tornos revólver y los tornos de mandril están también limitadas por esta operación secuencial no simultánea). Para incrementar la utilización de las herramientas de corte y la velocidad de producción existen las ***máquinas de barras de husillo múltiple***. Estas máquinas tienen más de un husillo, de manera que muchas piezas se pueden maquinar simultáneamente por muchas herramientas. Por ejemplo, una máquina de barras automática de seis husillos puede cortar seis piezas al mismo tiempo, como se muestra en la figura 22.9. Al final de cada ciclo de maquinado, los husillos (incluidas las boquillas y las barras de trabajo) se corren a la posición siguiente. En la figura, cada pieza debe ser cortada en forma secuencial por cinco juegos de herramientas de corte que toman seis ciclos de maquinado (la posición 1 es para avanzar la barra a una "tope"). Con este arreglo, cada pieza se completa al final de cada ciclo. Como resultado, una máquina automática para tornillos con seis husillos tiene la velocidad más alta de producción que cualquier máquina de torneado.

La secuenciación y la actuación de los movimientos en las máquinas para tornillos y de mandril se han controlado tradicionalmente por medio de levas y otros dispositivos mecánicos. La forma moderna es el ***control numérico computarizado*** (CNC), en el que las operaciones de la máquina herramienta son controlados por un "programa de instrucciones" (sección 39.1.4). El CNC es un medio sofisticado y muy versátil para controlar los dispositivos mecánicos, que ha conducido a la creación de máquinas herramienta capaces de ciclos de maquinado y formas geométricas más complejas y a niveles más altos de operación automática que las máquinas para tornillos convencionales y las máquinas de mandril.

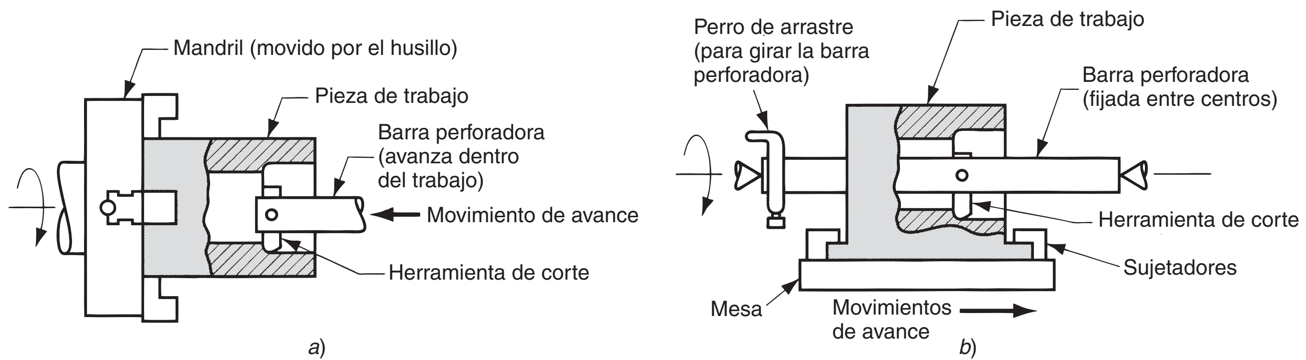


FIGURA 22.10 Dos formas de perforado horizontal: *a*) una barra perforada avanza dentro de una pieza de trabajo rotatoria y *b*) el trabajo avanza frente a una barra perforadora rotatoria.

El torno de CNC es un ejemplo de estas máquinas de tornear, y es especialmente útil para operaciones de torneado en contorno con tolerancias de trabajo estrechas. En la actualidad, casi todas las máquinas de barras y tornos de mandril se implementan con CNC.

22.1.5 Máquinas perforadoras

El perforado es similar al torneado. Usa una herramienta de una sola punta contra una pieza de trabajo en rotación. La diferencia es que el perforado se realiza en el diámetro interior de un agujero existente, en lugar de en el diámetro exterior de un cilindro existente. En efecto, el perforado es una operación de torneado interno. Las máquinas herramienta usadas para realizar las operaciones de perforado se llaman ***máquinas perforadoras*** (también ***molinos perforadores***). Se podría esperar que las máquinas perforadoras tuvieran características comunes con las máquinas de torneado; ciertamente, como se indicó antes, los tornos se usan algunas veces para realizar el perforado.

Las máquinas perforadoras pueden ser horizontales o verticales. La designación se refiere a la orientación del eje de rotación del husillo de la máquina o de la pieza de trabajo. En una operación de ***perforado horizontal***, la disposición se puede arreglar en cualquiera de dos formas. En la primera, el trabajo se fija a un husillo giratorio y la herramienta a una barra volada que la haga avanzar dentro del trabajo, como se ilustra en la figura 22.10*a*). La máquina que perfora en esta disposición debe ser muy rígida para evitar la deflexión y la vibración durante el corte. Para lograr alta rigidez, las barras perforadas se hacen frecuentemente de carburo cementado, cuyo módulo de elasticidad se aproxima a 620×10^3 MPa (90×10^6 lb/in^2). La figura 22.11 muestra una barra perforadora de carburo.

En la segunda disposición posible la herramienta se monta a una barra perforadora, la cual se soporta y gira entre sus centros. El trabajo se sujeta a un mecanismo de alimentación que lo pasa frente a la herramienta. Esta disposición, figura 22.10*b*), se puede usar para realizar una operación de perforado en un torno convencional.

Una ***máquina de perforado vertical*** (VBM por sus siglas en inglés) se usa para piezas pesadas de trabajo con diámetros grandes; por lo general el diámetro de la pieza de trabajo es más grande que su longitud. Como se muestra en la figura 22.12, la pieza se monta en una mesa de trabajo que gira respecto a la base de la máquina. Hay mesas de trabajo hasta de 40 pies de diámetro. La máquina perforadora típica puede poner en posición y hacer avanzar varias herramientas de corte simultáneamente. Las herramientas se montan en cabezales de herramientas que pueden avanzar horizontal y verticalmente respecto a la mesa de trabajo. Uno o dos cabezales se montan horizontalmente en un carril transversal y se ensamblan en el bastidor de herramientas de la máquina por encima de la mesa de trabajo. Las herramientas de corte montadas por encima del trabajo se pueden usar para carear y perforar. Además de las herramientas sobre el carril transversal, se pueden montar